

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341-Strojírenství

Materiály a technologie

zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Navlhavost PLA kompozitů s kokosovým plnivem

Moisture absorption of PLA composites with coconut fillers

Pavλίna Mikulová

KSP – TP – B

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce: Ing. Luboš Běhálek – *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	50
Počet tabulek	13
Počet příloh	15
Počet obrázků	32

Datum: 24.5.2013

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Pavlína Mikulová

Téma práce: Navlhavost PLA kompozitů s kokosovým plnivem

Moisture absorption of PLA composites with coconut fillers

Číslo BP: KST-TP-B

Vedoucí BP: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant BP: Ing. Luboš Běhálek – *TU v Liberci*

Abstrakt:

Tato práce je věnována problematice navlhavosti kompozitních materiálů s kokosovými vlákny a PLA matricí, v závislosti na velikosti obsahu vláken v polymeru a prostředí navlhání. Zabývá se především velikostí absorpce, za určitý časový úsek, v prostředí vzduchu a vody. Teoretická část je věnována teorii kompozitních materiálů a významu přírodních vláken v kompozitu. Velká část je pak věnována biodegradovatelným polymerům a jejich navlhavost, nasákavosti. V poslední části jsou pak uvedeny mechanické vlastnosti kompozitních materiálů a jejich zkoušky. Praktická část se zabývá sledováním a vyhodnocováním závislostí, mezi obsahem kokosových vláken a velikostí absorpce vlhkosti, změnám mechanických vlastností.

Abstract:

This work is devoted to problems with water absorption of composites with coconut fiber and PLA matrix, depending on the size of the fiber content in the polymer and the environment of moistening. It deals mainly the size of absorption, for a period of time, in an environment of air and water. The theoretical part is devoted to the theory of composite materials. Furthermore the importance of natural fibers in the composite. A large part is devoted to biodegradable polymers and their industrial use. The core is a section dealing with moisture absorption. They are presented here to express the moisture content and methods for determining moisture content in a polymer. In the last section are then listed the mechanical properties of composite materials and their testing. The practical part deals with monitoring and evaluating dependencies between the content of coconut fiber moisture absorption and sizes, as well as changes in the mechanical properties due to moisture in the polymer.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....
Pavλίna Mikulová
Na Ostrově 536
549 32 Velké Poříčí

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. Aleši Auspergerovi, Ph.D, za ochotu a pomoc při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Luboši Běhálkovi, za cenné rady a ochotnou pomoc.

V neposlední řadě patří velký dík mé rodině a blízkým, kteří mě podporovali po celou dobu studia na vysoké škole.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
1 ÚVOD	10
2 TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1 Kompozitní materiály	11
2.1.1 Základní vlastnosti kompozitních materiálů	11
2.1.2 Rozdělení kompozitních materiálů	13
2.1.3 Kompozitní materiály s přírodními vlákny	14
2.1.4 Kompozity a jejich použití	16
2.2 Biopolymery	17
2.2.1 Polylaktidová kyselina PLA	17
2.3 Biodegradovatelné polymery	18
2.3.1 Degradace polymerů	19
2.3.2 Biodegradace – přírodní recyklace	20
2.3.3 Materiálové vlastnosti biodegradovatelných polymerů	20
2.3.4 Průmyslové využití biodegradovatelných polymerů	21
2.4 Navlhavost a nasákavost	22
2.4.1 Důsledky nepřípustné vlhkosti v tavenině	22
2.4.2 Příčiny navlhavosti	22
2.4.3 Charakter vlhkosti	23
2.4.4 Charakteristika plastů dle navlhavosti	23
2.4.5 Vyjádření obsahu vlhkosti	24
2.4.6 Stanovení obsahu vlhkosti	24
2.5. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů	29
2.5.1. Rozdělení mechanických zkoušek	29
2.5.2. Stanovení tahových vlastností	30
2.5.3. Modul pružnosti a pevnost kompozitů	33

3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
3.1	Stanovení cílů bakalářské práce	34
3.2	Výroba zkušebních těles	34
3.2.1	Materiál zkušebních těles	34
3.2.2	Tvar zkušebních těles	35
3.2.3	Příprava materiálu pro vstřikování	35
3.2.4	Vstřikování zkušebních těles	36
3.3	Měření navlhavosti a nasákavosti	38
3.4	Tahová zkouška	42
3.4.1	Zkušební tělíska	42
3.4.2	Postup tahové zkoušky	42
3.4.3	Výpočet modulu pružnosti v tahu	43
3.4.4	Naměřené a vypočtené hodnoty	43
4	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUSE	44
4.1	Vyhodnocení výsledků navlhavosti a nasákavosti	44
4.2	Vyhodnocení výsledků tahové zkoušky	46
5	ZÁVĚR	47
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
7	SEZNAM PŘÍLOH	50

Seznam použitých zkratk a symbolů

CO ₂	oxid uhličitý
PLA	kyselina polylaktidová
PHA	polyhydroxyalkanoát
PHB	polyhydroxybutyrát
PHV	polyhydroxyvalerát
PBS	polybutylensukcinát
PBSA	polybutylensukcinát adipát
PCL	polykaprolakton
PGA	kyselina polyglykolová
PBST	polybutylensukcinát tereftalát
PBAT	polybutylenadipát tereftalát
PTMAT	polytetramethylenadipát tereftalát
PVA	polyvinylalkohol
PGA	kyselina polyglykolová
p _{atm}	atmosférický tlak [hPa]
w	obsah vlhkosti, vyjádřený hmotnostními procenty [%]
c	obsah vlhkosti, kg vody na kg absolutně suché látky [-]
V ₁	objem Fischerova činidla spotřebovaný při stanovení [mm ³]
V ₂	objem Fischerova činidla spotřebovaný při kontrolním stanovení [mm ³]
T	ekvivalent množství vody ve Fischerově činidle [g/ml činidla]
m	hmotnost vzorku [g]
m ₁	hmotnost vzorku na počátku [g]
m ₂	hmotnost vzorku po extrakci [g]
p _{pp}	tlak páry, jež se ustaví těsně nad povrchem sušeného materiálu [MPa]
p _{po}	parciální tlak páry okolí [MPa]
σ _y	napětí na mezi kluzu [MPa]
σ _m	mez pevnosti v tahu (smluvní) [MPa]
σ _b	napětí v tahu při přetržení [MPa]
ε _y	poměrné prodloužení na mezi kluzu [-], [%]
ε _m	poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu [-], [%]
ε _b	poměrné prodloužení při přetržení [-], [%]
E _t	modul pružnosti v tahu [MPa]
σ	hodnota příslušného napětí [MPa]

F	příslušná naměřená síla [N]
A	počáteční průřez zkušebního tělesa [mm ²]
ε	hodnota příslušného poměrného prodloužení [-], [%]
ΔL_0	zvětšení počáteční měřené délky zkušebního tělesa [mm]
ε_t	jmenovité poměrné prodloužení [-], [%]
L	upínací vzdálenost mezi čelistmi [mm]
L_t	zvětšení upínací vzdálenosti mezi čelistmi, ke kterému došlo od začátku zkoušky [mm]
E_t	modul pružnosti v tahu [MPa]
σ_1	napětí [MPa], naměřené při poměrném prodloužení $\varepsilon_1 = 0,05\%$
σ_2	napětí [MPa], naměřené při poměrném prodloužení $\varepsilon_1 = 0,25\%$
μ	Poissonův poměr [-]
$\Delta \varepsilon_n$	pokles poměrného prodloužení ve zvoleném příčném směru [-], [%]
$\Delta \varepsilon_1$	zvýšení poměrného prodloužení v podélném směru [-], [%]
L_0	počáteční měřené délky v podélném směru [mm]
n_0	počáteční měřené délky v příčném směru [mm]
Δn	pokles počáteční měřené délky v příčném směru [mm]

1 ÚVOD

Rychlý rozvoj výroby a rozšíření aplikačních oblastí polymerních materiálů v průběhu posledních desetiletí, má kromě hospodářského významu i různé negativní dopady. Polymerní materiály se uplatňují především kvůli jejich materiálovým vlastnostem, dostupnosti surovinových zdrojů a výrobním postupům. Vývoj polymerních materiálů byl vždy směřován ke zlepšování mechanických, fyzikálních i chemických vlastností. Dále pak k maximální stálosti vlastností a odolnosti v přírodním prostředí. Tento vývoj se stává příčinou obtíží při likvidaci polymerních výrobků z našeho životního prostředí.

Parametry moderních polymerních materiálů by měly splňovat nároky na funkčnost a vlastnosti. Zároveň by ale měly splňovat požadavky na degradaci, respektive biodegradaci.

Biodegradovatelné materiály by se proto mohly stát řešením tohoto problému. Biologickou degradací se biodegradovatelný polymer rozloží na vodu, oxid uhličitý a zbytkovou biomasu. Tyto polymery mají využití jako čisté materiály bez aditiv, nebo se mohou použít jako matrice kompozitních systémů, ve kterých se mohou uplatnit přírodní rostlinná vlákna. Cílem této bakalářské práce, je proto zjištění změny mechanických vlastností kompozitu s přírodními vlákny. Zaměřeno je na vlastnosti kokosových vláken. Dále pak zjištění navlhavosti a nasákavosti v časovém intervalu, v závislosti na obsahu těchto vláken.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Kompozitní materiály

Kompozit je pevná látka, složená nejméně ze dvou fází. Ty mohou být přírodní i umělé. V celku je dosahováno vlastností, které nemají jednotlivé složky a nedají se ani dosáhnout jejich sumací. Tento jev se nazývá synergický efekt (viz obr. 2.1). Ve své podstatě jsou kompozity nehomogenní, protože se skládají z více fází, ale jako technický materiál se však musí považovat za homogenní [1].

Definice používaná v USA, vytvořená ve spolupráci NASA a amerických vojenských vývojových center, používaná v Composite Metals Handbook:

Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužující elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí, ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní [2].

2.1.1 Základní vlastnosti kompozitních materiálů

Homogenita a nehomogenita

V atomárním měřítku je každý technický materiál nehomogenní. Proto je požadováno, aby nehomogenity v kompozitu byly v mnohem větším měřítku než atomárním. Zároveň, ale musí být dostatečně malé, aby bylo možné, v makroměřítku srovnatelném s rozměry konstrukčních dílů z tohoto kompozitu, považovat tento kompozit za homogenní materiál [2].

Izotropie a anizotropie

Běžné technické materiály jsou zcela izotropní, nebo jeví jen velmi malou anizotropii. Pro kompozitní materiály je typické, že mnoho z nich jeví velmi silnou anizotropii vlastností. Proto je nutné s anizotropií u kompozitů vždy počítat [2].

Z hlediska symetrie vlastností rozdělujeme materiály na:

Izotropní materiály – Mají ve všech směrech stejné vlastnosti. V řadě technických materiálů jsou základní jednotky (krystality) anizotropní, ale v důsledku náhodného rozdělení jejich velkého množství, je materiál jako celek izotropní [1].

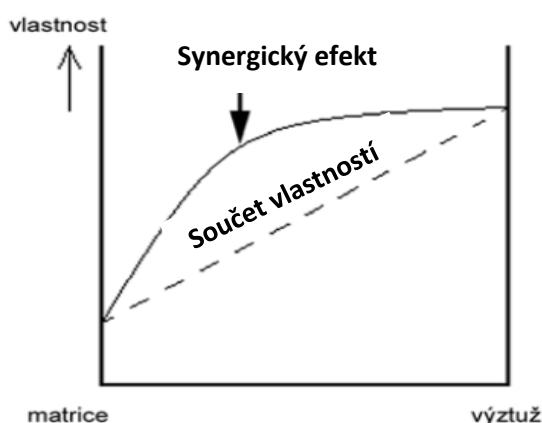
Anizotropní materiály – Mají vlastnost v každém směru jinou. S anizotropií kompozitů je možné se vyrovnat vhodným uspořádáním – lamináty, překližky. Někdy je možné anizotropii vědomě výhodně využít – luky, lyže [1].

Pseudoizotropní materiály – Mají vlastnosti stejné ve směru tří kolmých základních os a jsou symetrické podle tří rovin tvořenými těmito osami [2].

Ortotropní materiály – Mají vlastnosti symetrické podle tří vzájemně kolmých rovin. Ve třech kolmých směrech tvořených průsečnicemi těchto rovin (tzv. hlavní směry) mají vlastnosti vzájemně různé bez typických efektů anizotropie [2].

Příčné izotropní materiály – mají vlastnosti izotropní v určité rovině. Vlastnosti jsou symetrické podle této roviny a dvou rovin na ni i na sebe vzájemně kolmých. Tento případ je typický především pro kompozity [2].

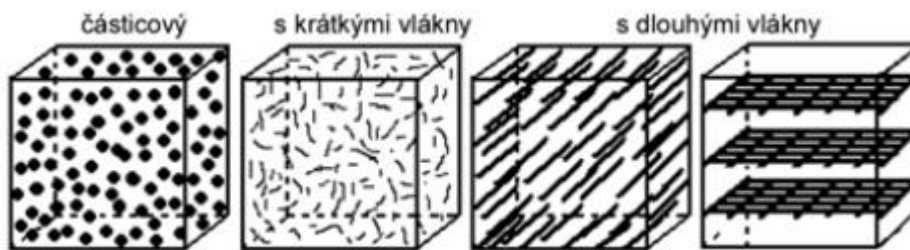
Synergický efekt – Je efekt, kdy dochází v kompozitu ke kombinaci pozitivních vlastností jeho složek tak, že celek přesahuje poměrný součet složek (obr. 2.1) [2].



Obr. 2.1 Znáznornění synergického efektu v kompozitním materiálu [1]

2.1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozity se dělí podle materiálu matrice a podle struktury výztuže. Dle materiálu matrice rozdělujeme kompozity s kovovou maticí (metal matrix composites – MMCs), s polymerní maticí (polymer matrix composites – PMCs), s keramickou maticí (ceramic matrix composites – CMCs), s anorganickou maticí a jejich kombinace. Podle struktury výztuže se kompozity dělí na disperzní, částicové a vláknové (obr. 2.2). Částice v kompozitech mohou být pravidelných tvarů (koule, destičky, tyčinky), nepravidelných tvarů, nebo mohou být tvořeny plynnými inkluzemi (lehčené polymery). Vláknové kompozity se dělí na kompozity s dlouhými vlákny, nebo s krátkými vlákny (obr. 2.2) [3].



Obr. 2.2 Rozdělení kompozitních materiálů [4]

V kompozitech se používají různé druhy vláken. Jsou to např. vlákna přírodní, skleněná, uhlíková a grafitová, aramidová, silonová, keramická, kovová vlákna a whiskery [2].

Průřez vláken je většinou kruhový a pohybuje se v širokém rozmezí [2]:

- do průměru 100 nanometrů – nanovlákna
- 0,1 – 1 mikrometrů – mikrovlákna – např. whiskery
- 1 – 10 mikrometrů – stření vlákna – uhlíková, skleněná, textilní
- nad 10 mikrometrů – hrubá vlákna

2.1.3 Kompozitní materiály s přírodními vlákny

Organická přírodní vlákna jsou získávána z pěstovaných rostlin. Mohou být lněná, bavlněná, konopná, jutová, kokosová atd. Základem všech těchto vláken je celulóza. Je nejrozšířenější organickou sloučeninou, která tvoří stěny rostlinných buněk. Kromě celulózy obsahují přírodní vlákna řadu jiných složek (viz tab. 2.1). Každý druh přírodního vlákna má také své specifické vlastnosti (viz tab. 2.2). Použití rostlinných vláken v termoplastech přináší výhody, jako je např. úspora polymeru, zrychlení výrobního cyklu. Tím dochází i ke snížení nákladů na výrobu. Povrch výrobku má díky těmto vláknům přírodní vzhled. Především, ale vzniká kompozit, který je recyklovatelný a biodegradovatelný. Každé vlákno má jiné chemické složení a jiné mechanické vlastnosti. Tyto hodnoty můžeme porovnat na obr. 2.1 a obr. 2.2 [5].

Tab. 2.1 Porovnání chemického složení jednotlivých přírodních rostlinných vláken [5]

typ vlákna	celulóza [% hmotn.]	lignin [% hmotn.]	hemicelulóza [% hmotn.]	pektiny [% hmotn.]	Vosky [% hmotn.]	úhel stoupání mikrofibril [°]	obsah vlhkosti [% hmotn.]
ze stonků							
juta	61 – 71,5	12,0 – 13,0	13,6 – 20,4	0,2	0,5	8,0	12,6
len	71	2,2	18,6 – 20,6	2,3	1,7	10,0	10,0
konopí	70,2 – 74,4	3,7 – 5,7	17,9 – 22,4	0,9	0,8	6,2	10,8
ramie	68,6 – 76,2	0,6 – 0,7	13,1 – 16,7	1,9	0,3	7,5	8,0
kenaf	31,0 – 39,0	15,0 – 19,0	21,5	-	-	-	-
z listů							
sisal	67,0 – 78,0	8,0 – 11,0	10,0 – 14,2	10,0	2,0	20,0	11,0
ananas	70,0 – 82,0	5,0 – 12,0	-	-	-	14,0	11,8
henequen	77,6	13,1	4,0 – 8,0	-	-	-	-
ze semen							
bavlna	82,7	-	5,7	-	0,6	-	-
z plodů							
kokos	36,0 – 43,0	41,0 – 45,0	0,15 – 0,25	3,0 – 4,0	-	41,0 – 45,0	8,0

Tab. 2.2 Porovnání vybraných vlastností přírodních rostlinných vláken a vláken běžně používaných v kompozitních systémech [5]

typ vlákna	hustota [g/cm ³]	průměr vlákna [μm]	mez pevnosti v tahu [MPa]	Youngův modul pružnosti [GPa]	protažení při lomu [%]
bavlna	1,5 – 1,6	-	287 – 800	5,5 – 12,6	7,0 – 8,0
juta	1,3 – 1,45	25 – 200	393 – 773	13 – 26,5	1,2 – 1,5
len	1,5	-	345 – 1100	27,6	2,7 – 3,2
konopí	1,5	-	690	-	1,6
ramie	1,5	-	400 – 938	61,4 – 128,0	1,2 – 3,8
sisal	1,45	50 – 200	468 – 640	9,4 – 22,0	3,0 – 7,0
ananas	-	20 – 80	413 – 1627	34,5 – 82,5	1,6
kokos	1,15	100 – 450	131 – 175	4,0 – 6,0	15,0 – 40,0
E-sklo	2,5	-	2000 – 3500	70,0	2,5
S-sklo	2,5	-	4570	86,0	2,8
aramid	1,4	-	3000 – 3150	63,0 – 67,0	3,3 – 3,7
uhlík	1,7	-	4000	230,0 – 240,0	1,4 – 1,8

Bavlna (obr. 2.3)

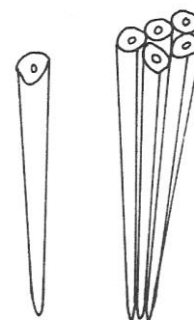
V bavlně se celulóza vyskytuje v téměř čisté podobě (i přes 99). Výška keřů je až 6 m dle typu, elementární vlákna až 50 mm. Vlákno je jediná buňka vyrůstající z pokožky semena. Vlákno má charakter zkroucené stužky, v příčném řezu fazolovitého tvaru [5].



Obr. 2.3 Bavlníkový keř [5]

Len

Vlákno lnu (obr. 2.4) je tvořeno z elementárních vláken, jejichž tvar odpovídá až šestibokému hranolu, jehož oba konce jsou zakončeny špičkami. Vlákno je tvořeno z několika vrstev. Do teploty 120°C je odolný, dále ztrácí barvu, účinkem slunečního záření postupně ztrácí pevnost. Špatně izoluje elektřinu, dobře vede teplo [5].



Obr. 2.4 Vlákna lnu [5]

Konopí (obr. 2.5)

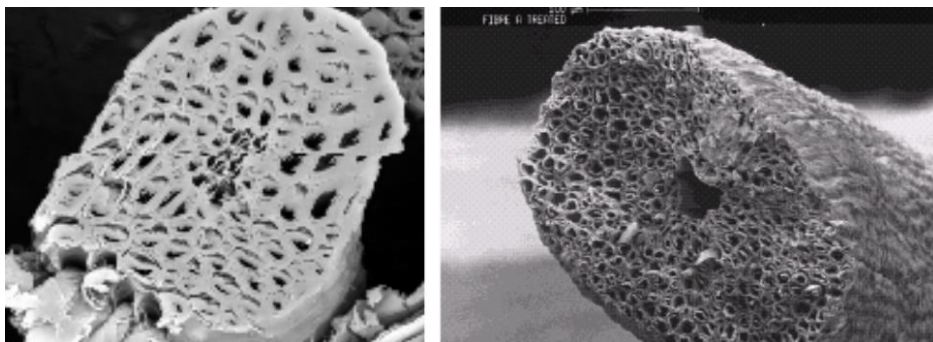
Elementární vlákna konopí jsou buňky vřetenovitého tvaru s tupými, případně rozvidlenými konci, v průřezu u mladého stonku téměř kulatá, později mnohoúhelníkového tvaru [5].



Obr. 2.5 Konopí [5]

Kokos

Kokosová vlákna (obr. 2.6) se získávají ze střední vrstvy oplodí kokosových ořechů. Elementární vlákna mají polygonální tvar příčného řezu, délku 0,3-1mm a příčný rozměr 12-14 μ m. Pevnost je kolem 131-175 MPa. Tažnost okolo 15-40% a je nejvyšší ze všech celulozových vláken. Počáteční modul je 4-6 GPa. Vláknem je lehčí než voda (0,945 g/cm³), má vysokou pevnost v oděr. Dobře izoluje proti hluku a horku [6].



Obr. 2.6 Kokosové vlákno [7]

2.1.4 Kompozity a jejich použití

Vytváření nových kompozitních materiálů je za účelem splnění některých požadavků, kterých jen těžko dosáhneme u klasických materiálů. Například jde o tyto požadavky [2]:

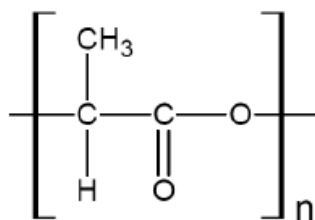
- zvýšení pevnosti, tuhosti a rozměrové stability
- zvýšení teplotní stability, zvýšení houževnatosti
- snížení nasákavosti
- modifikace elektrických vlastností, zvýšení korozní a chemické odolnosti
- redukce hmotnosti, zvýšení mechanického tlumení
- snížení negativního dopadu na životní prostředí, snížení ceny

2.2 Biopolymery

Biopolymery jsou vysokomolekulární organické látky, které jsou produkovány biochemickými reakcemi u rostlin, zvířat a mikroorganismů. Tyto materiály jsou biologicky rozložitelné. Biopolymery se od syntetických polymerů liší chemickou stavbou základního polymerního řetězce, ve kterém je na rozdíl od syntetických polymerů, vždy obsažen také kyslík nebo dusík. Právě tyto prvky umožňuje biopolymerům biologický rozpad. Biopolymery jsou popisovány ve dvou skupinách. První skupinu tvoří biopolymery přírodního původu, které jsou produkovány živými organismy jako vysokomolekulární látky. Patří mezi ně polysacharidy (cukry), proteiny (bílkoviny), polyester produkované mikroorganismy. Druhou skupinu tvoří speciální biopolymery, označované také jako syntetické. Tyto materiály jsou syntetizovány z tzv. biomolekul – monomerů, které se v přírodě nacházejí, ale nevykazují parametry vysokomolekulárních látek. Chemickými reakcemi jsou z nich vytvářeny biodegradovatelné polymery, které vykazují vlastnosti skutečných biopolymerů [8].

2.2.1 Polylaktidová (polymléčná) kyselina (PLA)

Kyselina polylaktidová je vyráběna z kyseliny mléčné, která vzniká např. fermentací cukrů nebo škrobů. Vhodně vedeným procesem, je tak možné vyrobit vysokomolekulární materiál vhodný pro medicínské aplikace, tak i polymer, který vykazuje vlastnosti dostatečné pro běžné aplikace. Polylaktidová kyselina (obr. 2.7) je vyráběna z laktidu, diesteru kyseliny mléčné, který může být získáván z přírodních zdrojů, i jako ropný produkt. Je možné získat tři izomerní formy této kyseliny. PLA je semikrystalická tuhá látka s teplotou skelného přechodu cca 45°C. Má dobré mechanické vlastnosti, kterými předčí i některé komerční termoplasty [8].



Obr. 2.7 Struktura PLA [8]

Vlastnosti PLA

Hustota PLA je okolo $1,24\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Pokud má nízký stupeň krystalinity, je poměrně vysoce transparentní. Naopak vysoký stupeň krystalinity zvyšuje základ a snižuje optické vlastnosti. Mechanické vlastnosti závisí na molekulové váze, nadmolekulární struktuře a orientaci molekul. S rostoucí krystalinitou roste pevnost v tahu a modul pružnosti, zatímco poměrné prodloužení klesá [9].

Biodegradace PLA

Biodegradace PLA může trvat týdny, až měsíce a probíhá ve dvou krocích. Nejprve vlivem vlhkosti hydrolyzují esterové vazby v hlavním řetězci, čímž dochází ke snížení molekulové hmotnosti. Vzniklé produkty jsou rozpustné ve vodě a mohou proniknout přes buněčnou stěnu do buněk mikroorganismů. Jsou přirozenou metabolickou cestou přeměněny především na vodu, CO_2 a další látky [10].

Využití v praxi

PLA je oblíbeným materiálem zejména v biomedicínských aplikacích (kontrolované uvolňování léčit, chirurgické a ortopedické pomůcky). Polylaktidová kyselina se využívá také k výrobě textilních vláken nebo potravinových obalů [8].

2.3 Biodegradovatelné polymery

Biodegradovatelné polymery jsou všechny polymery, ve kterých k degradaci dochází působením mikroorganismů, jako jsou bakterie, houby a řasy. Produkty degradace jsou oxid uhličitý, případně methan, voda a zbytková biomasa. Mezi biodegradovatelné polymery, lze zařadit všechny biopolymery a vybrané polymery minerálního původu [8].

Biodegradovatelné polymery minerálního původu je možné rozdělit do čtyř základních skupin [8]:

1) Alifatické polyestery

- Polymery přírodního původu (PHA, PHB, PHV)
- Polymery minerálního původu (PBS, PBSA, PCL)
- Polymery obojího původu (PLA, PGA)

- 2) Aromatické polyestery
 - Polybutylensukcinát tereftalát (PBST)
 - Polybutylenadipát tereftalát (PBAT)
 - Polytetramethylenadipát tereftalát (PTMAT)
- 3) Polyvinylalkohol
- 4) Modifikované polyolefiny

2.3.1 Degradace polymerů

Polymerní materiály se s časem neustále mění, dotváření a stárnou. Během jejich života dochází k samovolné a nenávratné změně struktury a vlastností, vlivem času a vnějších podmínek. Mezi tyto změny patří stárnutí, degradace, znehodnocování, odbourávání, koroze a porušování. Schopnost degradace plastů je možné rozdělit do tří základních skupin. Nedegradovatelné polymery, snadno degradovatelné polymery a programovatelně degradovatelné polymery [8].

Proces degradace probíhá ve dvou etapách:

- 1) Degradace materiálu při vlastním zpracování

Tato etapa je krátká, ale velmi intenzivní. Probíhá ve zpracovatelském stroji, kdy je tavenina plastu vystavena vysoké teplotě a mechanickému smykovému namáhání. Důsledkem této degradace může být odbourávání makromolekulárních řetězců a uvolňování plyných zplodin. I nízká míra degradace může způsobit významné změny fyzikálních vlastností. Proto je třeba polymer při zpracování chránit vhodnými stabilizátory [8].

- 2) Degradace konečného výrobku

Degradace probíhá v konečném stavu. Hotový materiál nebo výrobek, je vystaven v průběhu času několika vnitřním a vnějším vlivům. K vnitřním vlivům patří termodynamická rovnováha a k vnějším především teplota, sluneční záření, vzdušný kyslík, ozon, vlhkost, déšť, oxidy síry a dusíku, plyny a páry, kapaliny, působení mikroorganismů [8].

2.3.2 Biodegradace – přírodní recyklace

Pokud jsou biodegradovatelné polymery umístěny do bioaktivního prostředí, jakým je např. kompost, rozloží se prostřednictvím působení bakterií a hub na oxid uhličitý, vodu a případně malý organický zbytek – biomasu. Tento rozkladný proces je označován jako mineralizace. V biodegradačním procesu existují dva základní kroky. V první kroku dochází k depolymerizaci nebo štěpení polymerního řetězce na kratší polymerní segmenty (oligomery). Druhým krokem je jejich mineralizace. Pokud je při degradaci přítomen kyslík, jedná se o aerobní degradaci a výsledkem rozkladu je oxid uhličitý. Není-li přítomen kyslík, pak se jedná o anaerobní degradaci a výsledkem je methan. V některých případech mohou vznikat oba plyny. Stupeň biodegradace v půdě závisí na půdních podmínkách, jako je teplota, úroveň vlhkosti, stupeň provzdušnění, kyselost půdy a také na koncentraci mikroorganismů. Při extrémně nevýhodných podmínkách se proces biodegradace prakticky zastavuje [8].

2.3.3 Materiálové vlastnosti biodegradovatelných polymerů

Tyto polymery mohou být používány jako materiály čisté bez aditiv, nebo jako matrice kompozitních systémů, ve kterých jsou výztuží velmi často přírodní rostlinná vlákna – len konopí, bambus, ramie, juta, kokos a další. Kompozitní materiály na bázi biodegradovatelných polymerních matric vyztužené biodegradovatelnými vyztužujícími vlákny, jsou v současné době intenzivně studovány, zejména pro možnost tvorby zcela biodegradovatelných systémů z přírodních obnovitelných zdrojů. Některé vybrané vlastnosti biodegradovatelných polymeru jsou uvedeny v tab. 2.3 [8].

Tab.2.3. Hodnoty vybraných fyzikálních a mechanických parametrů některých biodegradovatelných polymerů [8]

Polymer	Teplota skelného přechodu [°C]	Teplota tání [°C]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [Mpa]	Prodloužení při lomu [%]
PCL	-60	59 - 64	4.28	390 - 470	700 - 1000
Škrob	-	110 - 115	35 - 80	600 - 850	580 - 820
PBAT	-30	110 - 115	34 - 40	-	500 - 800
PTMAT	-30	108 - 110	22	100	700
Celulóza	-	-	550 - 120	3000 - 5000	18 - 55
PLA	40-70	130 - 180	48 - 53	3500	30 - 240
PHB	0	140 - 180	25 - 40	3500	5.8
PHA	-30 - 10	70 - 170	18 - 24	700 - 1800	3.25
PHB-PHV	0 - 30	100 - 190	25 - 30	600 - 1000	7.15
PVA	58 - 85	180 - 230	28 - 46	380 - 530	100 - 200
PGA	35 - 40	225 - 230	890	7000 - 8400	30
PEA	-20	125 - 190	25	180 - 220	400

2.3.4 Průmyslové využití biodegradovatelných polymerů

Výrobky z biodegradovatelných polymerů nacházejí uplatnění tam, kde nejsou kladeny zásadní požadavky na vysoké hodnoty mechanických parametrů, ale především na schopnost materiálů samovolně se rozložit v přírodním prostředí. Mezi předměty vyrobené z biodegradovatelných polymerů patří např. pytle na odpadky a kompost, produkty používané v zemědělství např. mulčovací a ochranné fólie, kompostovatelné lahve a balící fólie na jedno nebo více použití, tuhé pěny využívané pro balení, servírovací předměty určené pro rychlé občerstvení, předměty používané na lodích a po použití rozložitelné v mořské vodě, biomedicínské materiály [8].

2.4 NAVLHAVOST A NASÁKAVOST

Pro působení vody rozlišujeme dva základní pojmy, navlhavost a nasákavost. Při styku materiálu s vodní parou dochází k navlhavosti – hygroskopičnosti, zatímco při ponoření materiálu do vody se mluví o nasákavosti. Navlhavost, je schopnost látek přijímat vlhkost z okolního prostředí. Základním fyzikálním jevem, při navlhavosti, je adsorpce molekul vody. Navlhání je dlouhodobý proces, při němž se v látce, uložené v prostředí, o dané stálé relativní vlhkosti a stálé teplotě, zvyšuje postupně počáteční malý obsah vlhkosti v jednotkovém objemu látky. Tento obsah se pak asymptoticky blíží rovnovážnému stavu vlhkosti v látce, který odpovídá dané relativní vlhkosti okolního prostředí. Rychlost navlhání je funkcí tlaku vodních par ve vzduchu [10].

2.4.1 Důsledky nepřipustně vysoké vlhkosti v tavenině

Důsledkem nepřipustně vysoké vlhkosti v tavenině jsou povrchové vady na výlisku. V případě, že je vlhkost vázána v materiálu, vytváří se v tavenině vodní páry a bubliny jsou transportovány přes rychlostní profil na čele toku k povrchu taveniny. Při jejich snaze vyrovnat tlak praskají a jsou postupujícím čelem toku ochlazeny na stěnách nástroje. Vlhkostní šmouhy se objevují na povrchu výrobku, jako otevřený profil ve tvaru U proti směru toku taveniny. V oblasti vlhkostních šmouh vykazuje výrobek hrubý, porézní povrch. Dalším důsledkem je zhoršení vlastností výstřiku, jako jsou fyzikální a teplotní vlastnosti, změna mechanických vlastností (snížení pevnosti, zvýšení houževnatosti), zhoršení dielektrických vlastností a zhoršení pevnosti svaru [10].

2.4.2 Příčiny navlhavosti

Navlhavost polymeru ovlivňuje jeho chemické složení. Nejvíce absorbují vodu polární plasty s hydrofilními skupinami v makromolekule. Dalším faktorem ovlivňující navlhavost jsou aditiva plastů. Organická plniva na bázi celulózy (např. bavlna, dřevěná moučky, kokos, juta, kenaf) zvyšují navlhavost. Naopak anorganická plniva (např. mletý křemen, skleněná vlákna) snižují navlhavost. Příčinou navlhavosti může být vlhkost na povrchu nástroje, kdy voda zkondenzuje na stěnách formy, nebo z důvodu netěsnosti temperačního systému. I způsob výroby granulátu ovlivňuje výskyt vlhkosti v polymeru. Dalším důvodem navlhání polymeru může být netěsnost obalů, nebo nevhodné skladování [10].

2.4.3. Charakter vlhkosti

Povrchová vlhkost

Voda je vázána přilnavostí k povrchu materiálu – např. při dlouhodobém vystavení plastů atmosferickému vzduchu. Velmi malé množství povrchové vlhkosti však nemusí mít negativní vliv na technologický proces. Jak velké množství vlhkosti bude příčinou vadného dílu, závisí na způsobu zpracování polymer a vlastních technologických podmínkách. Obecně platí, že čím vyšší je teplota taveniny, tím nižší je přípustný obsah vlhkosti plastů [10].

Kapilární vlhkost

Voda je vázána kapilárními silami v celém objemu (v mikrokapilárách). V tomto případě je odpařování ztíženo, protože voda v kapilárách je jakoby pod vyšším tlakem a pro sušení se musí použít vyšší teploty, než bod varu při p_{atm} [10].

2.4.4 Charakteristika plastů dle navlhavosti

Plasty se dělí, dle navlhavosti, na dvě skupiny. A to na nenavlhavé a navlhavé. Nenavlhavé materiály jsou materiály, které nemají schopnost přijímat vlhkost, ani ji absorbovat. Obecně jsou tyto polymery schopné pojmout vlhkost hlavně při nesprávné manipulaci. Jestliže je například polymer vyjmutý z chladného, nevyhřátého prostoru skladu a přemístěn do teplého prostoru výroby, může dojít ke kondenzaci vlhkosti z teplého vzduchu na relativně chladný povrch polymeru. Nenavlhavé polymery jsou ale často směsí nenavlhavých přísad. Druhou skupinu tvoří navlhavé plasty. Tyto plasty se vyznačují schopností absorbovat vodu z okolního vzduchu. Jestliže je polymer vystaven atmosferickému vzduchu dojde k přesunu vodních par ze vzduchu do polymeru, přičemž se některé molekuly vody navážou na řetězec polymeru pomocí mezimolekulárních sil. Absorbování vlhkosti se mění v závislosti na čase a postupně se zpomalí, popřípadě zastaví dosáhne-li vlhkost granulátu rovnováhy s okolním vzduchem [10].

2.4.5. Vyjádření obsahu vlhkosti

- Hmotnostními procenty „w“
 - udávají počet dílů vody ve 100 dílech vlhkého plastu
- V kilogramech vody/ kilogram sušiny „c“
 - výsledky udávají kilogram vody připadající na jeden kilogram absolutně suché látky (sušiny) [10]

Jaké množství vlhkosti z atmosférického vzduchu absorbuje navlhavý polymer, závisí na teplotě polymeru a na relativní vlhkosti vzduchu. Navlhavý polymer vystavený atmosférickému vzduchu, bude absorbovat vodní páry až do okamžiku, kdy nastane rovnováha s okolním vzduchem. Tento proces může trvat několik minut, ale také několik dní. Záleží na typu polymeru a na relativní vlhkosti vzduchu. Proces absorbování vlhkosti i proces sušení je vratný a je řízen základními parametry jako je teplotou polymeru, elativní vlhkostí vzduchu, dobou sušení v předepsaném prostředí, cirkulací vzduchu v sušárně, velikostí granulátu [10].

2.4.6. Stanovení obsahu vlhkosti

Pro stanovení obsahu vlhkosti se používají chemické, termogravimetrické metody nebo metoda ztráty hmotnosti sušením.

Chemické metody	- Karl Fischerova analytická metoda (titrační metoda)
	- Metoda extrakce vody xylénem
	- Manometrická metoda pomocí hydridu vápenatého
	- Metoda využívající karbidu vápenatého
	- Metoda pomocí kyseliny sírové

Termogravimetrické metody - Halogenový analyzátor

Ztráta hmotnosti sušením	- Sušení v horkovzdušných sušárnách
--------------------------	-------------------------------------

Planimetrická metoda	- Test TVI (Tomasetti's Volatile Indicator) [10]
----------------------	--

Karl-Fischerova titrační metoda

Odebere se vzorek cca o hmotnosti 100g v případě granulí, pokud je odebírán z výrobku odebere se potřebné množství nařezané kousky cca 4x4x3 a vloží se do suché skleněné kónické titrační baňky a uzavře zátkou. Pipetou je přidáváno 50ml bezvodného methanolu. Současně se pro kontrolní stanovení do jiné baňky odpipetuje 50ml bezvodného methanolu. Na baňky jsou nasazeny zpětné chladiče s připojenými trubicemi s chloridem vápenatým (sušidlem). Baňky se vaří pod zpětným chladičem 3hodiny a poté se nechají 45minut vychladnout na teplotu okolí. Z baňek jsou vysunuty chladiče a zazátkují se. S použitím přístroje podle KF se obsah každé baňky titruje Fischerovým činidlem [10].

Dle vztahu (1) platí:

$$w = \frac{(V_1 - V_2) \cdot T}{m} \cdot 100 \quad (1)$$

V_1 – objem Fischerova činidla spotřebovaný při stanovení [mm^3]

V_2 – objem Fischerova činidla spotřebovaný při kontrolním stanovení [mm^3]

T – ekvivalent množství vody ve Fischerově činidle [g/ml činidla]

m – hmotnost vzorku [g]

Metoda extrakce vody xylénem

Zkouška se provádí v Aufhäuserově přístroji, který se sestává z varné baňky, speciálního nástavce s odměrnou jímkou a zpětného chladiče. Do baňky se vloží odvážené množství plastu, přelije se nadbytkem xylénu a směs se přivede k varu. Páry xylénu strhávají páry vody uvolněné z plastu. Po ochlazení par ve zpětném chladiči xylén i voda zkondenzují a současně dojde k oddělení vody od xylénu. Metoda se nedá použít u plastů, které se ve vroucím xylénu rozpouštějí nebo jsou jím jinak napadány (např. PE, PP, PS, ABS, PVC, atd.). Metoda je vhodná zejména pro práškové lisovací hmoty [10].

Dle vztahu (2) platí:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (2)$$

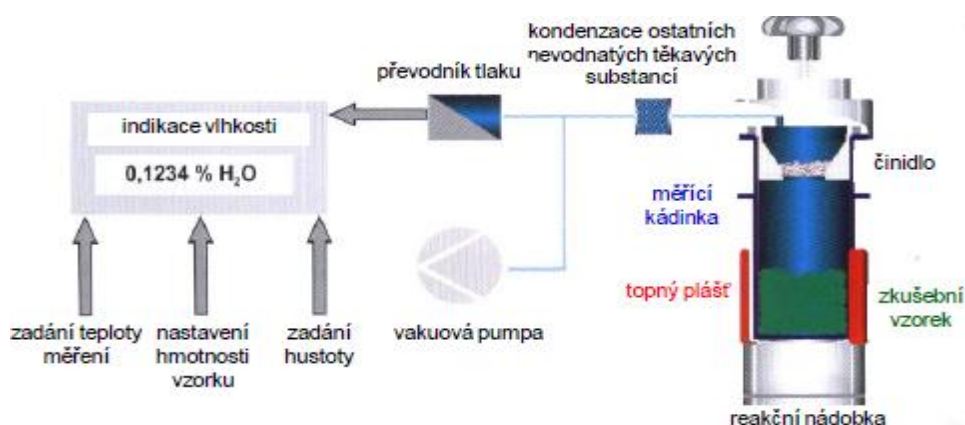
w – procento vlhkosti ve vzorku [%]

m_1 – hmotnost vzorku na počátku [g]

m_2 – hmotnost vzorku po extrakci [g]

Manometrická metoda pomocí CaH_2

Pod vakuem a za působení tepla (80°C až 200°C) se z měřeného materiálu uvolňuje vodní pára. Vyhodnocuje se její reakce s činidlem, při kterém se vyvíjí vodík a změna tlaku v systému se měří jako vlhkost obsažená v měřeném materiálu (obr. 2.8). Tlak plynu v nádobce se zvyšuje a je přímo úměrná uvolněnému množství vody. Měření probíhá za vyloučení všech rušivých vlivů, jako je např. vlhkost vzduchu. Metoda zajišťuje měření pouze skutečné vlhkosti v měřeném materiálu. Na počátku měření je z nádoby vakuovou pumpou odsát vzduch. Výsledky jsou srovnatelné s výsledky stanovené metodou Karl Fischer [10].



Obr. 2.8 Reakční schéma zařízení Aquatrac [10]

Halogenový analyzátor

Stanovení vlhkosti plastu pomocí halogenového analyzátoru (obr. 2.9). Patří mezi nejnovější a efektivní způsob stanovení vlhkosti u plastů. Přístroj pracuje na základě termogravimetrického principu, kdy na začátku měření stanoví analyzátor vlhkosti hmotnost vzorku (minimální hmotnost vzorku je 1-10g). Následně je vestavěným halogenový topným modulem (topnou spirálou) rychle zahříván a dochází k odpařování vlhkosti z daného vzorku polymeru. Přístroj během sušení stanovuje neustále hmotnost vzorku a po ukončení sušení se zobrazí výsledná hodnota obsahu vlhkosti [10].

Dle vztahu (3) platí:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \quad (3)$$

w – procento vlhkosti ve vzorku [%]

m₁ – hmotnost navlhnutého vzorku [g]

m₂ – hmotnost vzorku po sušení [g]



Obr. 2.9 Halogenový analyzátor [10]

Sušení v sušárnách

Podle uspořádání procesu

- s přetržitým provozem
- s nepřetržitým provozem

Podle tlaku při kterém se suší - atmosférické

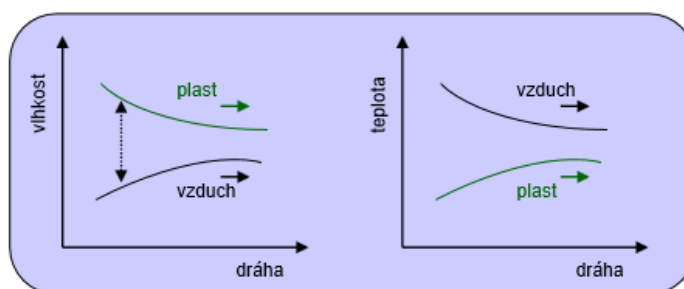
- vakuové

Podle oběhového systému

- uzavřený oběh
- otevřený oběh
- s nuceným oběhem
- přirozený oběh [10]

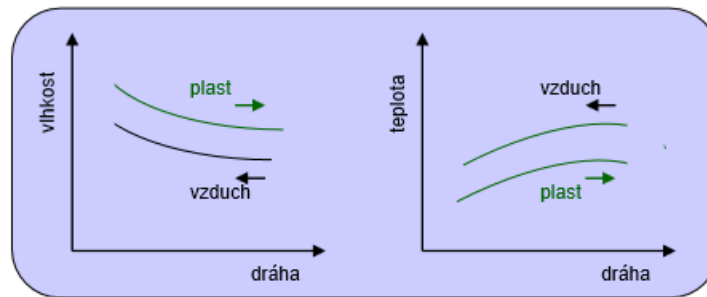
Podle vzájemného pohybu sušeného materiálu a média

- souproudé (obr. 2.10) – Na začátku na sebe působí materiál s největším obsahem vlhkosti a suchý vzduch s největší teplotou. Ze sušárny odchází materiál s nejnižší a vzduch s nejvyšší vlhkostí [10].



Obr. 2.10 Souproudé sušení [10]

- protiproudé (obr. 2.11) – sušící médium s nejvyšší teplotou a nejnižší vlhkostí se stýká s vysušeným materiálem, zatímco ochlazený vzduch s vysokou vlhkostí přichází do styku s vlhkým materiálem vstupujícím do sušárny. Sušící potenciál je po celé délce sušárny rozdělen rovnoměrně. Přesto je doba sušení delší než u souproudu (díky malému sušicímu potenciálu na vstupu) [10].



Obr. 2.11 Protiproudé sušení [10]

- se zkříženými proudy – dosahováno je jako velkého potenciálu, tak vysoké rychlosti sušení [10].

Způsoby sušení

Způsoby sušení mohou být: sušení v peci, mikrovlnné sušení, sušení horkým vzduchem, sušení tlakovým vzduchem, sušení voštinovými kotouči, sušení suchým vzduchem, sušení ve vakuu [10].

Podmínka sušení

$$p_{pp} > p_{po}$$

p_{pp} – tlak páry, jež se ustaví těsně nad povrchem sušeného materiálu

p_{po} – parciální tlak páry okolí

Sušení probíhá do okamžiku, kdy $p_{pp} = p_{po}$. Materiál lze vysušit jen do určité vlhkosti, zvané **rovnovážná vlhkost** [10]

2.5. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů

Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů jsou funkcí řady parametrů, z nichž nejdůležitější jsou mechanické vlastnosti matrice a výztuže, délka vláken výztuže, objemový podíl a uspořádání výztuže. Pro kompozitní materiály je charakteristická tzv. synergický efekt, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání kvalitativně zcela nových vlastností [4].

2.5.1 Rozdělení mechanických zkoušek

Zkoušení materiálu je v praxi nezbytnou součástí nejen vlastního výrobního postupu, ale i kontroly výrobků. K posuzování mechanických vlastností materiálů slouží mechanické zkoušky. Tyto zkoušky nám umožňují poznat vlastnosti materiálu pro jejich účelné využití [11].

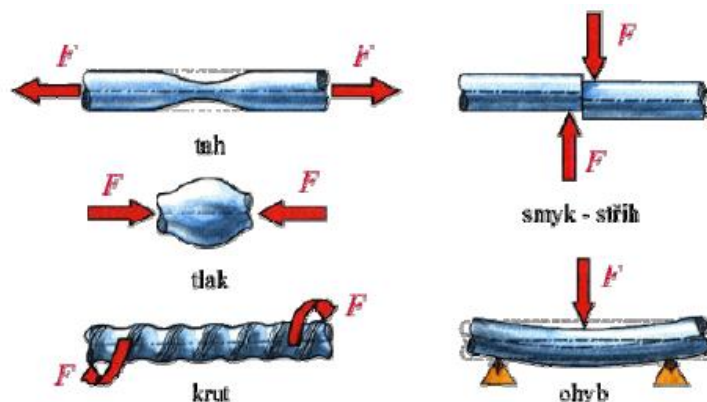
Dle charakteru zatěžování [11]:

- Statické zkoušky (rychlý zatěžování vzorku je konstantní)
- Dynamické zkoušky rázové (síla narůstá rychle a během krátkého okamžiku dosahuje maxima)
- Únavové zkoušky cyklické (síla mění jak svou velikost, tak i směr)

Dle teploty, při které se zkouška realizuje:

- Zkoušky při normální teplotě
- Zkoušky při zvýšené/snížené teplotě

Dle druhu působícího namáhání: (viz obr. 2.12)

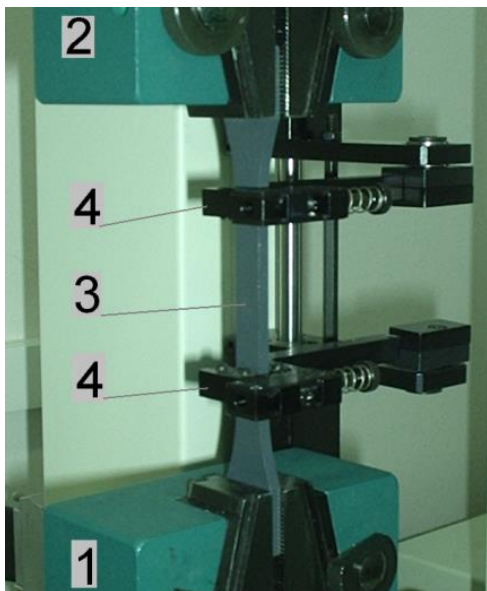


Obr. 2.12 Základní druhy mechanického namáhání[11]

2.5.2 Stanovení tahových vlastností

Mechanické vlastnosti, zjišťované zkouškou tahem, závisí na struktuře plastu, tvaru zkušební tělesa, rychlosti zatěžování, podmínkách kondicionace a zkoušení (vlhkosti a teplotě). Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní osy konstantní rychlostí až do jeho porušení, nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu nebo poměrné prodloužení dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení [12].

Na rozdíl od kovů se u plastů uvažuje deformace celková, norma pro plasty nezná pojem plastické deformace. U tahových vlastností způsobuje viskoelastické chování plastů nelineární průběh křivek napětí/poměrné prodloužení a to i v oblasti lineární viskoelastivity. Tento efekt je zřejmý v případě houževnatých plastů. V důsledku toho, hodnoty tangenciálního modulu určené z počáteční části křivek napětí/poměrné prodloužení závisí na použitém měřítku os. Tato konvenční metoda (tangenta k počátečnímu bodu křivky) nedává u těchto materiálů spolehlivé hodnoty modulů. Proto měření modulu E_t vychází ze dvou hodnot poměrných prodloužení, tj. 0,25% a 0,05%. V případě křehkých plastů poskytují obě metody stejné hodnoty [12].

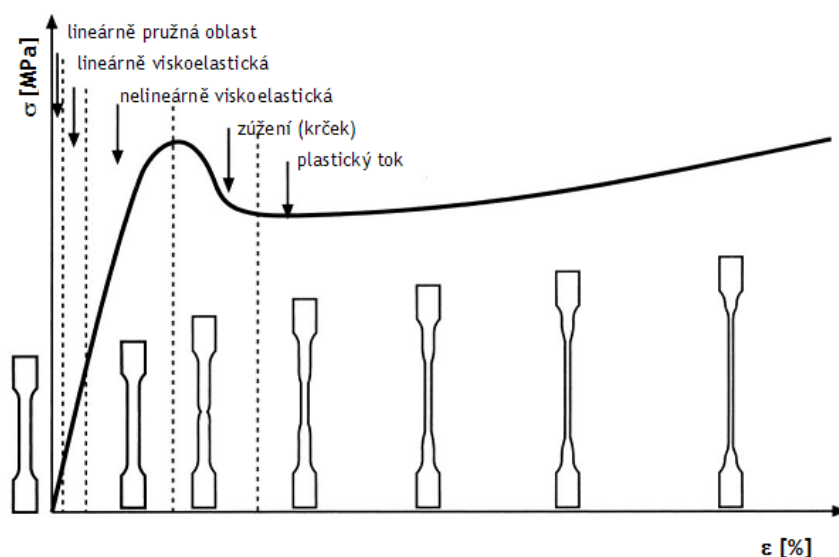


Ze zkoušky je stanoveno:

- σ_y napětí na mezi kluzu
- σ_m mez pevnosti v tahu (smluvní)
- σ_b napětí v tahu při přetržení
- ε_y poměrné prodloužení na mezi kluzu
- ε_m poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu
- ε_b poměrné prodloužení při přetržení
- E_t modul pružnosti v tahu [13]

Obr. 2.13 Zkušební zařízení

*(1) spodní čelist, (2) horní čelist,
(3) zkušební vzorek, (4) průtahoměr [13]*



Obr. 2.14 Tahový diagram semikrystalického polymeru [13]

Výpočet tahové zkoušky

Evropská norma: EN ISO 527-1:2012

Napětí

Všechny hodnoty napětí, jako je napětí na mezi kluzu σ_y , mez pevnosti σ_m , napětí při x % prodloužení, napětí při přetržení, se vypočítají pomocí rovnice (4)

[14]:
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

kde je σ hodnota příslušného napětí [MPa]

F příslušná naměřená síla [N]

A počáteční průřez zkušebního tělesa [mm²]

Poměrné prodloužení

Poměrné prodloužení stanovené pomocí průtahoměru

Poměrné prodloužení na mezi kluzu, poměrné prodloužení při přetržení a poměrné prodloužení na mezi pevnosti se vypočítá podle následující rovnici [14]:

Dle vztahu (5) platí:
$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (5)$$

kde je ε hodnota příslušného poměrného prodloužení [-], [%]

L_0 počáteční měřená délka zkušebního tělesa [mm]

ΔL_0 zvětšení počáteční měřené délky zkušebního tělesa [mm]

Jmenovité poměrné prodloužení

Jmenovité poměrné prodloužení se použije, když se nepoužívá průtahoměr, například v případě miniaturních zkušebních těles. Zaznamená se posun čelistí stroje od začátku zkoušky [14].

Dle vztahu (6) platí:

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \quad (6)$$

kde je ε_t jmenovité poměrné prodloužení [-], [%]

L upínací vzdálenost mezi čelistmi [mm]

L_t zvětšení upínací vzdálenosti mezi čelistmi, ke kterému došlo od začátku zkoušky [mm]

Modul pružnosti v tahu

Modul pružnosti určený jako sečna křivky napětí/poměrné prodloužení (viz obr. 2.15) [14].

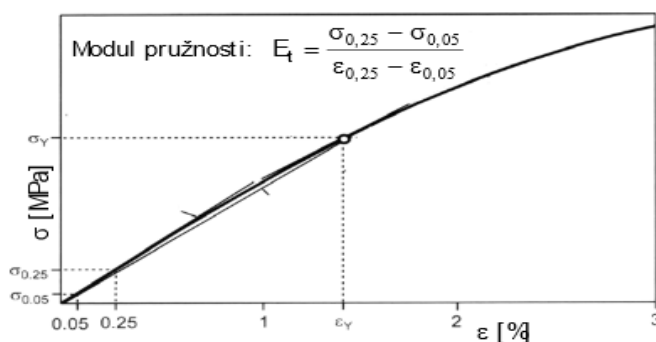
Dle vztahu (7) platí:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (7)$$

kde je E_t modul pružnosti v tahu [MPa]

σ_1 napětí [MPa], naměřené při poměrném prodloužení $\varepsilon_1 = 0,05\%$

σ_2 napětí [MPa], naměřené při poměrném prodloužení $\varepsilon_2 = 0,25\%$



Obr. 2.15 Definice modulu pružnosti[15]

Poissonův poměr [14]

Dle vztahu (8) platí:

$$\mu = \frac{\Delta \varepsilon_n}{\Delta \varepsilon_1} = - \frac{L_0}{n_0} \frac{\Delta n}{\Delta L_0} \quad (8)$$

kde je μ Poissonův poměr [-]

$\Delta \varepsilon_n$ pokles poměrného prodloužení ve zvoleném příčném směru [-], [%]

$\Delta \varepsilon_l$ zvýšení poměrného prodloužení v podélném směru [-], [%]

L_0, n_0 počáteční měřené délky v podélném, popř. příčném směru [mm]

Δn pokles počáteční měřené délky v příčném směru [mm]

ΔL_0 odpovídající pokles počáteční měřené délky v podélném směru [mm]

Tahové vlastnosti plastů závisí na:

- teplotě
- času (*důsledek viskoelastického chování*)
- technologických podmínkách výroby
- aditivech
- molekulární struktury
- nadmolekulární struktury
- chemickém složení plastu
- geometrii zkušebního tělesa
- způsobu jeho přípravy [12]

2.5.3 Modul pružnosti a pevnost kompozitů

Výsledné elastické chování kompozitů závisí na tvaru výztuže a jejím rozložení v objemu kompozitu [4].

Vláknové kompozity

Kromě mechanických vlastností matrice a vláken jsou vlastnosti výsledného kompozitu určeny rovněž objemovým podílem vláken a jejich uspořádání. Pokud jsou vlákna uspořádána v jednom směru, pak nejvyšší mechanické vlastnosti dosahuje kompozit právě ve směru vláken. Požadujeme-li vysokou pevnost a tuhost ve dvou směrech, pak používáme struktury vyztužené vrstvami splétaných vláken. Jsou-li žádoucí izotropní vlastnosti, pak lze aplikovat výztuž složenou z náhodně uspořádaných krátkých vláken [4].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Stanovení cílů bakalářské práce

Na základě literární rešerše a zadání bakalářské práce byly stanoveny následující experimentální cíle bakalářské práce:

- Připravení zkušebních těles z polylaktidu s rozdílným procentuálním poměrem kokosových vláken.
- Stanovení průběhu růstu obsahu vlhkosti ve vzorkách, které jsou vystaveny vlhkosti ve vzduchu a vlhkosti ve vodě, po určitém časovém intervalu
- Podrobení vzorků testování mechanických vlastností pomocí tahové zkoušky
- Vyhodnocení a diskuze výsledků, navlhavosti, vlhkosti v plastu versus mechanické vlastnosti.
- Přehledné zpracování získaných výsledků

3.2 Výroba zkušebních těles

3.2.1 Materiál zkušebních těles

Zkušební vzorky byly vyrobeny z granulátu polymeru kyseliny mléčné PLA Ingeo biopolymer 3052D. Některé informace o použitém materiálu jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Vybrané vlastnosti PLA Ingeo biopolymer 3052D

MECHANICKÉ VLASTNOSTI	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti v tahu	3394,29	MPa
Mez kluzu (mez pevnosti)	65,95	MPa
Poměrné prodloužení na mezi kluzu	2,25	%
Napětí v tahu při přetržení	60,15	MPa
Poměrné prodloužení při přetržení	3,46	%
Rázová houževnatost Charpy (+23oC)	18,76	kJ/m ²
Rázová houževnatost Charpy (-35oC)	25,09	kJ/m ²
Modul pružnosti v ohybu	3168,00	MPa
Pevnost v ohybu	91,86	MPa
Tvrдост - Shore D	79,55	-

OSTATNÍ VLASTNOSTI		
Hustota	1,2472266	g/cm ³

3.2.2 Tvar zkušebních těles

Dle normy ČSN EN ISO 527-2, byl tvar zkušebního tělesa zvolen tvar oboustranných lopatek typu 1A (obr. 3.10), který se používá pro vstřikovaná víceúčelová zkušební tělesa.

3.2.3 Příprava materiálu pro vstřikování

Materiál pro výrobu vzorků byl vytvořen smícháním granulátu čistého PLA biopolymeru (obr. 3.1) s určitou dávkou kokosových vláken (obr. 3.2) v poměru tak, aby vznikly vzorky kompozitu PLA s 10%, 20% a 30% kokosových vláken. Byla použita kokosová vlákna krátká, která byla ve vzorku náhodně uspořádána. Toto uspořádání má za následek izotropní vlastnosti.



Obr. 3.1 PLA biopolymer



Obr. 3.2 Kokosová vlákna

Tato směs byla dávkována do násypky vytlačovacího stroje, který je součástí linky na výrobu granulátu (obr. 3.5), kde se pomocí rotačního pohybu šneku plastifikuje a přes kalibrační hlavu vytlačuje do vodní lázně (obr. 3.3).



Obr. 3.3 Vodní lázeň



Obr. 3.4 Fréza

Přes vodní lázeň byla struna vytlačovaného materiálu zchlazena a dále byla vedena k fríze (obr. 3.4), kde byla nasekána na granulát.

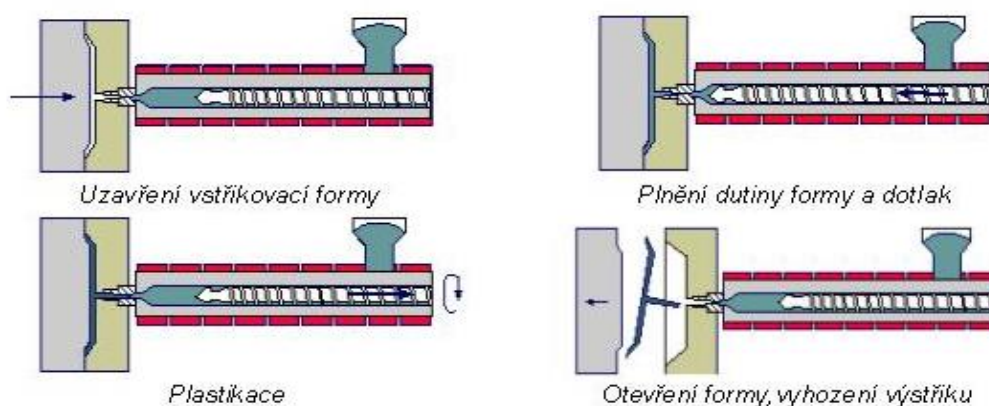


Obr. 3.5 Linka na výrobu granulátu

3.2.4 Vstřikování zkušebních těles

Cyklus vstřikování (obr. 3.6)

Plast v podobě granulátu je nasypán do násypky, z níž je odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje (šnekem, pístem), která hmotu dopravuje do tavicí komory, kde za současného účinku tření a topení (obr. 3.8) plast taje a vzniká tavenina. Tavenina je následně vstřikována do dutiny formy, kterou zcela zaplní a zaujme její tvar. Následuje dotlaková fáze pro snížení smrštění a rozměrových změn. Plast předává formě teplo a ochlazením ztuhne ve finální výrobek. Ochlazování probíhá díky temperačnímu systému formy, který je řízen temperační jednotkou (obr. 3.9). Následně se forma otevře a výrobek je vyhozen pomocí vyhazovačů.



Obr. 3.6 Vstřikovací cyklus[16]

Vzorky byly vstřikovány na vstřikovacím stroji:

ARBURG Allrounder 270s 400-100 (Obr. 3.7)



Obr. 3.7 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 270s 400-100

Tab. 3.2 Parametry vstřikování vzorků

Parametry vstřikování	Hodnota	Jednotka
Teplota na válci	185	°C
Teplota formy	30	°C
Teplota pod násypkou	40	°C
Protitlak	1	MPa
Dekomprese objemu	4	cm ³
Doba chlazení	15	s
Vstřikovací rychlost	25	cm ³ /s
Objem dávky	40	cm ³
Doba dotlaku	35	s
Velikost dotlaku	60	MPa
Celkový čas cyklu	60	s
Uzavírací síla	400	kN
Průměr šneku	25	mm



Obr. 3.8 Teplota na válci



Obr. 3.9 Temperační jednotka (TERM)



Obr. 3.10 Vzorky vyrobené vstřikováním s vtokovou soustavou

3.3. Měření navlhavosti a nasákavosti

Cílem této práce je zjištění schopnosti navlhavosti a nasákavosti vzorků, vyrobených z PLA biopolymeru s určitým obsahem kokosových vláken. Dále pak porovnání změny jejich mechanických vlastností vlivem vlhkosti v polymeru.

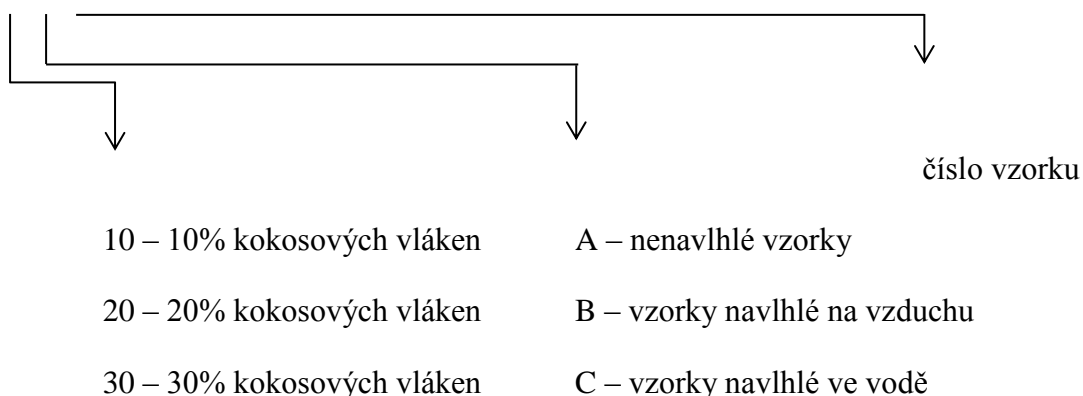
Postup měření:

1. Rozdělení vzorků do skupin a jejich označení
2. Měření počátečních hmotností
3. Průběžné měření změny hmotností
4. Určení obsahu vlhkosti pomocí halogenových vah

Rozdělení vzorků bylo provedeno tak, aby vznikly tři skupiny. V každé z nich byly vzorky s 10%, 20% a 30% obsahu kokosových vláken po 15 vzorcích. První skupina byla vystavena vlhkosti na vzduchu, druhá ve vodě a třetí skupinu vzorků jsme uložili do exsikátoru, aby vzorky zůstaly nenavlhle. Exsikátor je tlustostěnná dvojdielná nádoba, která slouží k uchování vzorků nenavlhle.

Označení vzorků:

x/y/z



Podmínky při navlhání vzorků na vzduchu

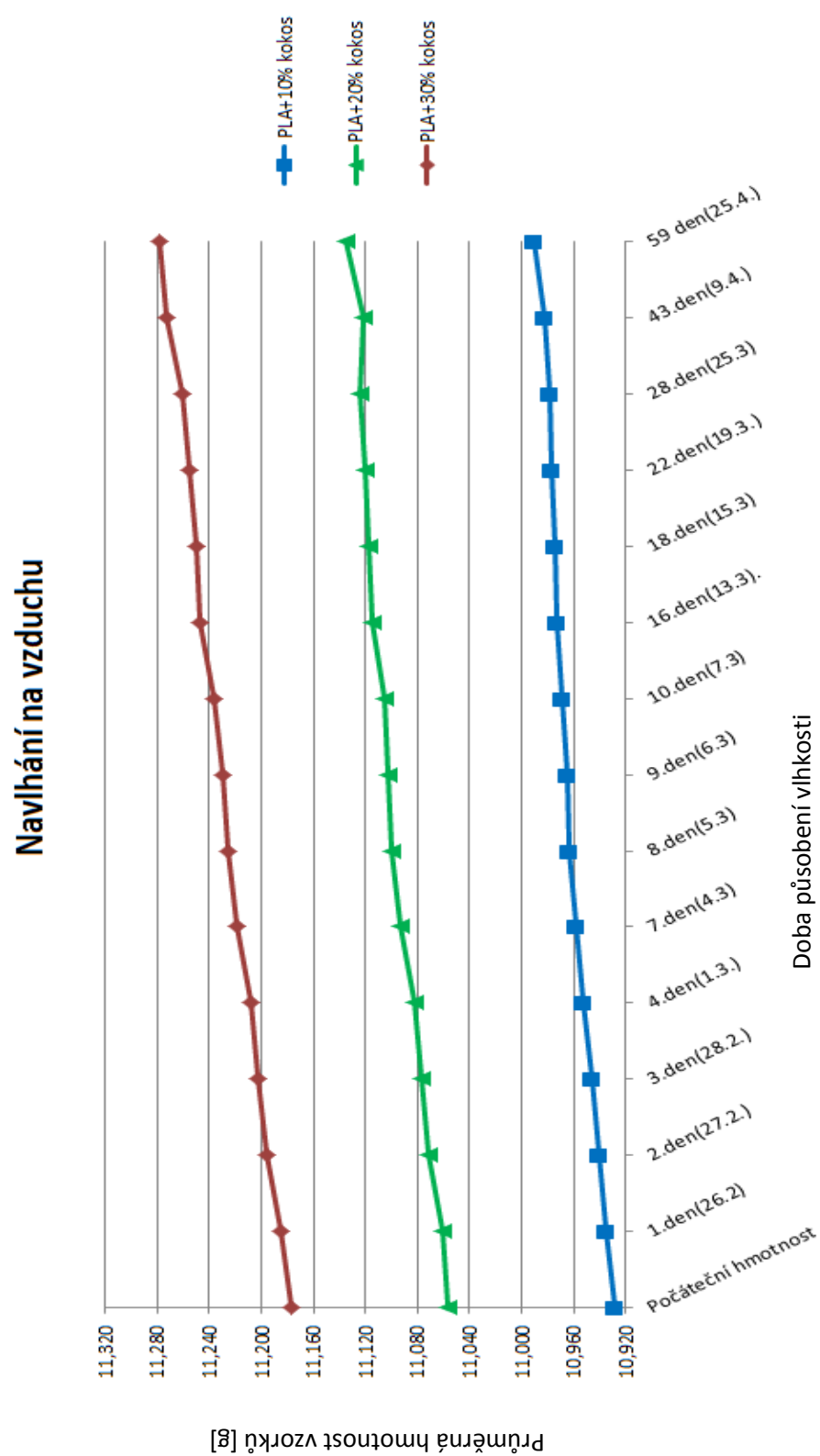
Vlhkost vzduchu: 49%

Teplota vzduchu: 23°C

Podmínky při navlhání vzorků ve vodě

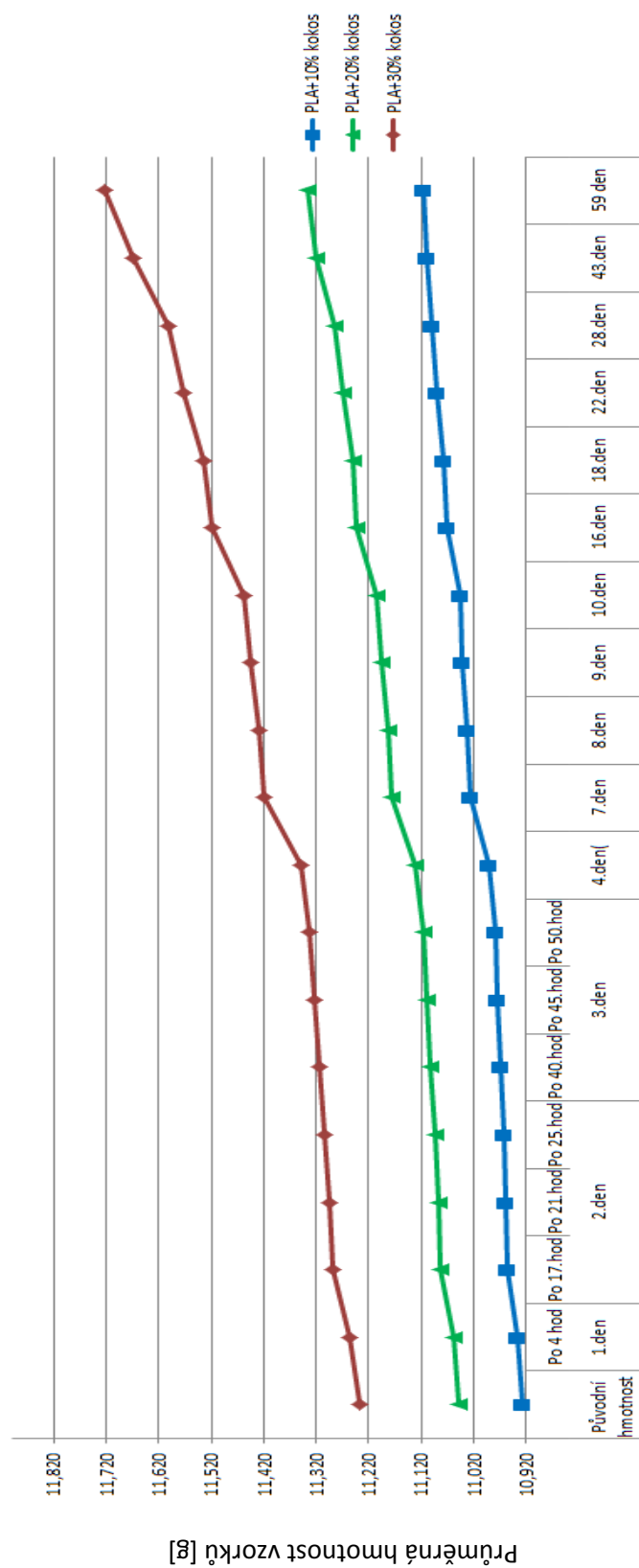
Teplota vody: 20 °C

Vzorky byly vystaveny těmto podmínkám po dobu 59 dnů. V tomto časovém intervalu jejich hmotnost rostla vlivem navlhavosti a nasákavosti. Tyto změny byly průběžně měřeny na laboratorních vahách AND GF-300-EC. Na obrázku 3.11 a 3.12, je vyobrazen pomocí grafů nárůst průměrných hodnot hmotností vzorků. Tyto průměrné hodnoty jsou do 28. dne vypočítány z 15 vzorků. Dále jsou pak počítány z 10 vzorků a to z důvodu provedení tahové zkoušky, na pěti vzorkách z každé skupiny, po 28 dnu vystavení vlhkosti. V příloze 1-6, jsou pak grafy průběhu navlhání všech vzorků.



Obr. 3.11 Průběh změny hmotnosti vzorků při navlhání na vzduchu

Navlhání ve vodě



Obr. 3.12 Průběh změny hmotnosti vzorků vlivem nasakování ve vodě

3.4 Tahová zkouška

Podstatou této zkoušky bylo zjištění změny mechanických vlastností PLA biopolymeru s kokosovými vlákny, v závislosti na vlhkosti v polymeru obsažené. Tahová zkouška byla provedena na trhačím stroji Hounsfield H 10 KT, software QMAT. Rychlost posuvu čelistí byla nastavena na hodnotu 50mm/min. Zkouška probíhala za teploty 24°C a 36% relativní vlhkosti. Měřena byla maximální pevnost v tahu σ , modul pružnosti v tahu E a poměrné prodloužení při přetržení ϵ . Tahová zkouška byla realizována pro nenavlhle vzorky jednou a pro vzorky navlhající na vzduchu a nasakující ve vodě, dvakrát. Každé měření bylo provedeno na pěti vzorcích od každého typu kompozitu (10%, 20%, 30% kokos) a z každého prostředí. Z těchto hodnot byl vypočítán aritmetický průměr a stanovila se směrodatná odchylka. Získané hodnoty pro σ_p , E a A byly sestaveny do tabulek 3.3 – 3.7. První měření tahové zkoušky proběhlo **po 28 dnech**, kdy byly vzorky vystaveny vlhkosti ve vzduchu a ve vodě. Druhé měření tahové zkoušky proběhlo **po 59 dnech**. Zkouška proběhla dle normy ČSN EN ISO 527-2/1A/50.

3.4.1 Zkušební tělíska

Zkušební tělíska byla vyrobena z PLA polymeru s příměsí 10%, 20% a 30% kokosových vláken. Vstřikování vzorků bylo provedeno na vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 270s 400-100 (viz kapitola 3.2. Vstřikovaná zkušební tělesa měla tvar oboustranných lopatek typu 1A. Šířka pracovní části vzorku byla 10mm a tloušťka 4mm.

3.4.2 Postup tahové zkoušky

Do počítače, který byl připojen k trhačím zařízení, byly zadány parametry zkušební vzorku společně s typem vzorku. Zkušební těleso bylo upnuto do čelistí zkušebního stroje tak, aby podélná osa zkušební tělesa byla totožná s osou upínacích čelistí. Zkušební těleso bylo protahováno ve směru své hlavní osy konstantní rychlostí. Měřilo se zatížení působící na zkušební těleso a jeho prodloužení, až do jeho přetržení. Při průběhu tahové zkoušky byl zároveň na monitoru zakreslován tahový diagram.

3.4.3 Výpočet modulu pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu byl vypočítán dle vzorce (9) $E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$ (obr. 2.17),

kde hodnoty σ_1 , σ_2 a ε_1 , ε_2 byly odečteny z grafu tahové zkoušky.

3.4.4 Naměřené a vypočtené hodnoty

Hodnoty mechanických vlastností jsou uvedeny jako průměry z 5 vzorků. Hodnoty pro všechny vzorky jsou uvedeny v příloze 7-11.

Tab. 3.3 Mechanické vlastnosti nenavlhých vzorků - PLA+10%, 20%, 30% kokos

Procento kokosu	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Tažnost při přetržení [%]
10%	68,16 ± 0,53	3479,35 ± 42,66	2,30 ± 0,04
20%	67,81 ± 1,43	3698,52 ± 74,91	1,69 ± 0,24
30%	65,72 ± 1,85	3844,80 ± 79,89	1,47 ± 0,15

Tab. 3.4 Mechanické vlastnosti vzorků navlhajících na vzduchu – PLA+10%, 20%, 30% kokos - První tahová zkouška (28. den)

Procento kokosu	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Tažnost při přetržení [%]
10%	64,52 ± 0,80	3317,76 ± 82,20	2,36 ± 0,29
20%	62,01 ± 0,84	3604,85 ± 16,04	2,24 ± 0,07
30%	60,56 ± 1,64	3715,56 ± 55,46	2,16 ± 0,10

Tab. 3.5 Mechanické vlastnosti vzorků navlhajících na vzduchu - PLA+10%, 20%, 30% kokos - Druhá tahová zkouška (59. den)

Procento kokosu	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Tažnost při přetržení [%]
10%	63,80 ± 0,93	3272,26 ± 89,42	2,62 ± 0,31
20%	61,98 ± 0,72	3573,56 ± 67,91	2,45 ± 0,29
30%	59,53 ± 0,91	3688,85 ± 77,28	2,38 ± 0,18

Tab. 3.6 Mechanické vlastnosti vzorků nasakujících ve vodě – PLA+10%, 20%, 30% kokos - První tahová zkouška (28. den)

Procento kokosu	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Tažnost při přetržení [%]
10%	57,99 ± 1,09	3074,98 ± 47,84	3,69 ± 0,19
20%	56,36 ± 0,46	3303,75 ± 30,04	3,57 ± 0,39
30%	53,64 ± 0,61	3476,63 ± 49,45	3,47 ± 0,33

Tab. 3.7 Mechanické vlastnosti vzorků nasakujících ve vodě – PLA+10%, 20%, 30% kokos - První tahová zkouška (59. den)

Procento kokosu	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Tažnost při přetržení [%]
10%	52,69 ± 0,41	2952,70 ± 47,45	3,77 ± 0,13
20%	51,91 ± 0,77	3113,03 ± 67,53	3,75 ± 0,21
30%	45,10 ± 2,53	3212,33 ± 28,86	3,54 ± 0,32

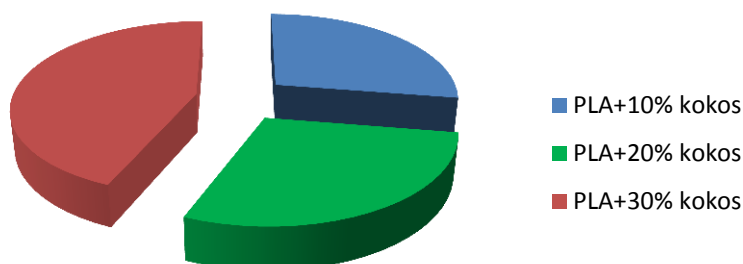
4 VYHODNOCENÍ VÝSLEKŮ A JEJICH DISKUSE

4.1 Vyhodnocení výsledků navlhavosti a nasákavosti

Vzorky byly hodnoceny z hlediska vzrůstu hmotnosti vlivem navlhavosti a nasákavosti. Byly zaznamenávány průběžné hodnoty hmotností (příloha 12-15) po dobu 59 dnů, pomocí kterých byl vytvořen graf průběhu navlhání vzorků (příloha 1-6). Grafy průměrných hodnot navlhavosti a nasákavosti jsou zobrazeny na obr. 3.11, obr. 3.12). Porovnány byly hmotnosti vzorků před působením vlhkosti a hmotnosti vzorků po době 59 dnů, kdy byly vzorky vystaveny vlhkosti ve vzduchu a ve vodě. Průměrný nárůst hmotností v [g] u jednotlivých skupin byl spočítán, do 28 dne působení vlhkosti, z 15 vzorků. Dále pak z 10 vzorků z každé skupiny. Tento nárůst byl stanoven pomocí halogenového analyzátoru a můžeme ho porovnat v tab. 3.2.. Vzorek byl vložen do předehřátých halogenových vah a byl vystaven teplotě 120°C po dobu 8 hodin. Po ukončení měření, byla na displeji zobrazena procentuální hodnota vlhkosti ve vzorku obsažená. Toto měření bylo provedeno na 10 vzorkách z každé skupiny (PLA+10%, 20%, 30% kokos). Z těchto hodnot byl pak stanoven aritmetický průměr pro každou skupinu.

Tab. 3.8 Průměrný nárůst hmotnosti vzorků vlivem navlhání na vzduchu

Vzorky	Průměrný nárůst hmotnosti [g]	Průměrný nárůst vlhkosti [%]
PLA+10% kokos	0,062	0,565
PLA+20% kokos	0,066	0,590
PLA+30% kokos	0,102	0,900



Obr. 3.13 Průměrný nárůst hmotnosti vzorků vlivem navlhavosti [%]

Z grafu na obr. 3.11 a z výsledků v tab. 3.8 je patrné, že nejvíce navlhavé jsou vzorky s 30% kokosových vláken. Je zřejmé, že množství kokosových vláken v polymeru ovlivňuje navlhavost. Čím více kokosových vláken je v plastu obsaženo, tím více plast navlhá.

Tab. 3.9 Průměrný nárůst hmotnosti vzorků vlivem nasákavosti ve vodě

Vzorky	Průměrný nárůst hmotnosti [g]	Průměrný nárůst vlhkosti [%]
PLA+10% kokos	0,185	1,665
PLA+20% kokos	0,283	2,494
PLA+30% kokos	0,516	4,387



Obr. 3.14 Průměrný nárůst hmotnosti vzorků vlivem nasákavosti [%]

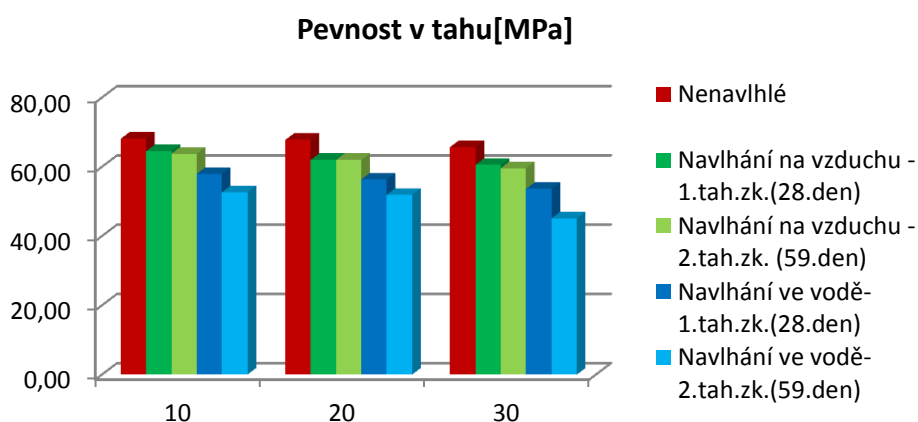
V případě navlhání vzorků ve vodě docházím k podobným výsledkům, jako při navlhání ve vzduchu. Opět nejvíce navlhají vzorky s 30 % obsahu kokosových vláken, jak můžeme vidět na obr. 3.11 a v tab. 3.13. Čím více je tedy ve vzorku obsaženo kokosových vláken, tím více vzorek navlhá. Oproti vzorkům vystaveným vlhkosti ze vzduchu, vzorky vystavené vlhkosti ve vodě do sebe absorbují, za stejný časový úsek, více vlhkosti. O kolik je tato hodnota jiná, můžeme vidět v tab. 3.4.

Tab. 3.10 Kolikrát více absorbovaly vlhkost vzorky ve vodě, oproti vzorkům na vzduchu

Vzorky	Nárůst vlhkosti vzorků ve vodě, oproti vzduchu
PLA+10% kokos	3,0 krát více
PLA+20% kokos	4,3 krát více
PLA+30% kokos	4,8 krát více

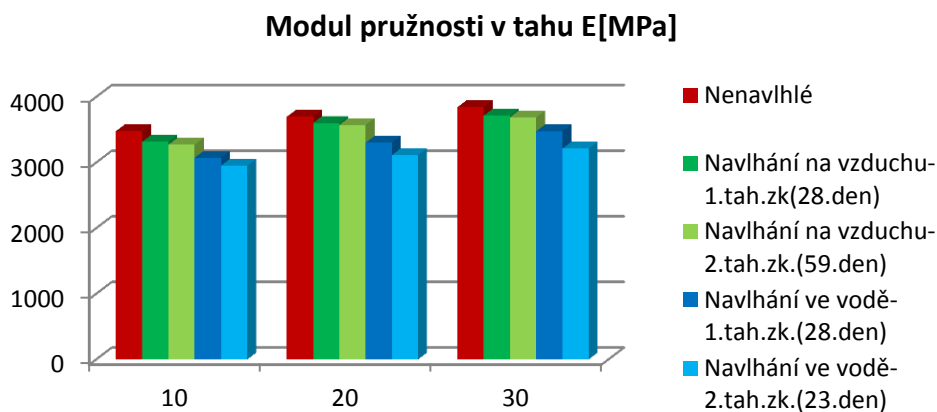
4.2 Vyhodnocení výsledků tahové zkoušky

Z průměrných hodnot uvedených v tab. 3.3 až 3.7 a z obr. 3.15 je patrné, že pevnost v tahu s rostoucím obsahem kokosových vláken klesá. V závislosti na obsahu vlhkosti ve vzorku, pevnost v tahu také klesá. To znamená, že s rostoucím obsahem kokosových vláken a s rostoucím procentem vlhkosti ve vzorku, klesá pevnost v tahu. Vyplývá tedy, že nejvyšší hodnoty meze pevnosti v tahu, má vzorek PLA s 10% kokosových vláken. Vidíme tedy, že obsah vláken má vliv na mechanické vlastnosti. A to nejen z důvodu obsahu vláken, ale také proto, že vzorky s 10% kokosových vláken navlhají méně, než vzorky s 30% kokosových vláken.



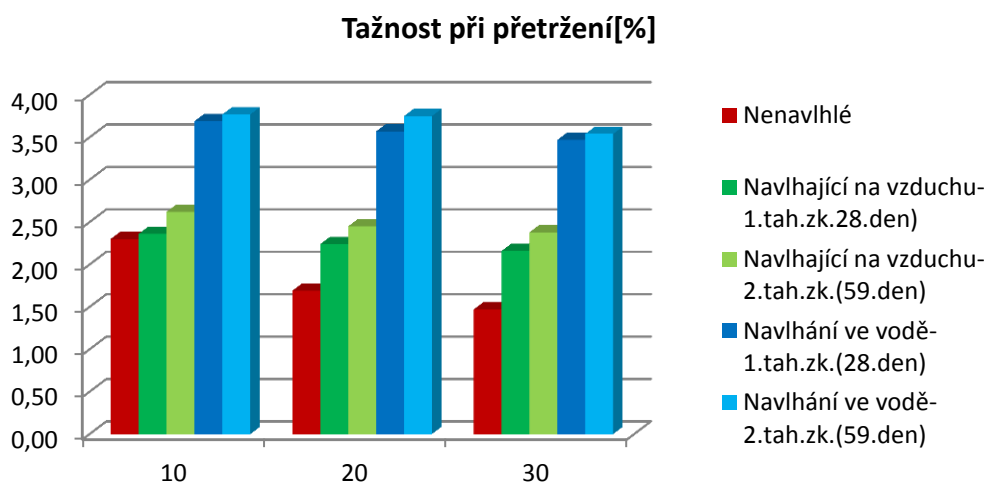
Obr. 3.15 Porovnání pevnosti v tahu u vzorků PLA+10%, 20%, 30% kokos

Jak můžeme porovnat na obr. 3.16, modul pružnosti v tahu, s rostoucím obsahem kokosových vláken ve vzorku, roste. V závislosti na obsahu vlhkosti, ale modul pružnosti klesá. Čím více je tedy ve vzorku kokosových vláken, tím je modul pružnosti v tahu vyšší. Pokud jsou ale vzorky vystaveny vlhkosti, s rostoucím obsahem vlhkosti ve vzorku, klesá modul pružnosti v tahu.



Obr. 3.16 Porovnání modulu pružnosti v tahu u vzorků PLA+10%, 20%, 30% kokos

Tažnost při přetržení, s rostoucím obsahem kokosových vláken, klesá. S obsahem vlhkosti, ve vzorku obsažené, však roste (obr. 3.17).



Obr. 3.76 Porovnání tažnosti při přetržení u vzorků PLA+10%, 20%, 30% kokos

5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zjištění míry navlhavosti kompozitního materiálu, s kokosovými vlákny a PLA matricí, v závislosti na obsahu těchto vláken. Dále pak zjištění vlivu vlhkosti v kompozitu na mechanické vlastnosti. Byly vyrobeny vzorky kompozitního materiálu PLA s obsahem 10%, 20% a 30% kokosových vláken. Nejprve byl vytvořen granulát, pomocí granulační linky a poté byly vzorky vyrobeny vstřikováním. Tyto vzorky byly rozděleny do tří skupin po 15 kusech od každého typu kompozitu (PLA+10%, 20%, 30% kokosu). První skupinu tvořily vzorky, které byly vystaveny vlhkosti na vzduchu. Druhá skupina vzorků byla vystavena vlhkosti ve vodě a třetí skupina byla vložena do exsikátoru, aby vzorky zůstaly nenavlhle. Vzorky byly vystaveny těmto podmínkám po dobu 59 dnů. V tomto časovém intervalu jejich hmotnost rostla vlivem navlhavosti a nasákavosti.

Průměrný nárůst hmotností, udávaný v procentech, byl stanoven pomocí halogenového analyzátoru. Vzorky navlhající na vzduchu obsahovaly v průměru u PLA+10% kokosu 0,565% vlhkosti, PLA+20% kokosu 0,590% vlhkosti a PLA+30% kokosu 0,900% vlhkosti. Vzorky nasakující ve vodě obsahovaly v průměru u PLA+10% kokosu 1,665% vlhkosti, PLA+20% kokosu 2,494% vlhkosti a PLA+30% kokosu 4,387% vlhkosti. Vzorky navlhající ve vodě, byly oproti vzorkům

vystaveným vlhkosti ze vzduchu navlhle více a to u PLA+10% kokosu přibližně 3 krát, PLA+20% kokosu 4,3 krát a PLA+30% kokosu 4,8 krát. Bylo zjištěno, že nejvíce navlhavé a nasákavé jsou vzorky s 30% obsahem kokosových vláken. Je tedy zřejmé, že množství kokosových vláken v polymeru ovlivňuje navlhavost a nasákavost. Čím více kokosových vláken je v plastu obsaženo, tím více plast navlhá.

Dále byla provedena zkouška mechanických vlastností a to pomocí tahové zkoušky. Dospělo se k závěru, že pevnost v tahu s rostoucím obsahem kokosových vláken klesá. V závislosti na obsahu vlhkosti ve vzorku, pevnost v tahu také klesá. To znamená, že s rostoucím obsahem kokosových vláken a s rostoucím procentem vlhkosti ve vzorku, klesá pevnost v tahu. Obsah vláken má tedy vliv na mechanické vlastnosti. A to nejen z důvodu obsahu vláken, ale také proto, že vzorky s 10% kokosových vláken navlhají méně, než vzorky s 30% kokosových vláken. Modul pružnosti v tahu, s rostoucím obsahem kokosových vláken ve vzorku, roste. V závislosti na obsahu vlhkosti, ale modul pružnosti klesá. Čím více je tedy ve vzorku kokosových vláken, tím je modul pružnosti v tahu vyšší. Pokud jsou ale vzorky vystaveny vlhkosti, s rostoucím obsahem vlhkosti ve vzorku, klesá modul pružnosti v tahu. Tažnost při přetržení, s rostoucím obsahem kokosových vláken, klesá. S obsahem vlhkosti, ve vzorku obsažené, však tažnost roste.

Navlhání je dlouhodobý proces, při němž se v látce, uložené v prostředí, o dané stálé relativní vlhkosti a stálé teplotě, zvyšuje postupně počáteční malý obsah vlhkosti v objemu látky. Tento obsah se asymptoticky blíží rovnovážnému stavu vlhkosti v látce, který odpovídá dané relativní vlhkosti okolního prostředí. Lze proto předpokládat, že nárůst vlhkosti bude pokračovat a mechanické vlastnosti se budou dále měnit.

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
- [2] DAŘOUREK, K.: Kompozitní materiály – druhy a jejich užití. Liberec: TU v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1
- [3] http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CEoQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.kmt.tul.cz%2Fedu%2Fpodklady_kmt_bakalari%2FNOM2%2FKOMPOZITY_podklady.ppt&ei=EuWQUc6QNZH1sgbe9YCoDA&usg=AFQjCNFPxgYPBT8VKYQQqxGFzKDOWNINPQ&sig2=P0cDpIXneeKLnkOQVks7w&bvm=bv.46340616,d.Yms
- [4] <http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>
- [5] www.kmt.tul.cz [cit.2011-04-12]
- [6] HOFER: Textil- und Modelexikon, Deutscher Fachverlag Frankfurt: Main 1997, ISBN 3-87150-518-8, Band 1, str. 466
- [7] http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/20061005/6-rostlinna_vlakna.pdf
- [8] KROISSOVÁ, D.: Biodegradovatelné polymery - úvod do problematiky. Liberec: TU v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-468-9
- [9] Bioplasty- materiál budoucnosti II [online]. 2007 [cit.2010-2-13]. Dostupný z www: <http://www.gate2biotech.cz/bioplasty-material-budoucnosti-ii/>
- [10] <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Suseni.pdf>
- [11] http://xyz12345.wz.cz/tmr/zkousky_mech.html
- [12] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/laboratore/N/4b_b.pdf
- [13] http://www.technomat.cz/data/katedry/ksp/KSP_VIP_PR_06_CZE_Behalek_Fyzikalni_a_mechanicke_vlastnosti_plastu.pdf
- [14] ČSN EN ISO 257-1,2:2012. Plasty – stanovení tahových vlastností
- [15] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p7/tah2.pdf
- [16] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm

Seznam příloh

- Příloha 1: Průběh navlhání vzorků PLA +10% kokos - na vzduchu
- Příloha 2: Průběh navlhání vzorků PLA +20% kokos - na vzduchu
- Příloha 3: Průběh navlhání vzorků PLA +30% kokosu na vzduchu
- Příloha 4: Průběh nasákavosti vzorků PLA +10% kokos - ve vodě
- Příloha 5: Průběh nasákavosti vzorků PLA +20% kokos - ve vodě
- Příloha 6: Průběh nasákavosti vzorků PLA +30% kokos - ve vodě
- Příloha 7: Mechanické vlastnosti nenavlhklých vzorků – PLA+10%, 20%, 30% kokos
- Příloha 8: Mechanické vlastnosti navlhklých vzorků ve vzduchu - 1. tahová zkouška po 28. dnu navlhání - PLA+10%, 20%, 30% kokos
- Příloha 9: Mechanické vlastnosti navlhklých vzorků ve vzduchu - 2. tahová zkouška po 59. dnu navlhání - PLA+10%, 20%, 30% kokos
- Příloha 10: Mechanické vlastnosti vzorků nasakujících ve vodě - 1. tahová zkouška po 28. dnu navlhání - PLA+10%, 20%, 30% kokos
- Příloha 11: Mechanické vlastnosti vzorků nasakujících ve vodě - 2. tahová zkouška po 59. dnu navlhání - PLA+10%, 20%, 30% kokos
- Příloha 12: Naměřené hmotnosti vzorků navlhajících na vzduchu – PLA+10%, 20% kokos
- Příloha 13: Naměřené hmotnosti vzorků navlhajících na vzduchu – PLA+30% kokos
- Příloha 14: Naměřené hmotnosti vzorků nasakujících ve vodě – PLA+10%, 20%
- Příloha 15: Naměřené hmotnosti vzorků nasakujících ve vodě – PLA+30% kokos